

**І. С. КІСІЛЬ**, д-р техн.наук, проф. Івано-Франківський НТУНІГ  
**Б. В. КОСТИВ**, аспірант, Івано-Франківський НТУНІГ

### **МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ БАГАТОКРАТНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРИ БЕЗКОНТАКТНОМУ ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ ПІДЗЕМНИХ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ**

Описана сутність методики получения нормальных уравнений на основе многократных результатов наблюдений напряженности магнитного поля бесконтактным методом над подземными трубопроводами с целью повышения точности определения токов в их стенках, а также параметров их местонахождения. Проведено числовое моделирование предложенной методики, которое подтвердило ее работоспособность и возможность использования при наличии промышленных помех в результатах наблюдений.

Essence of method of receipt of normal equalizations is described on the basis of frequent results of supervisions of magnetizing force by a non-contact method above underground pipelines with the purpose of increase of exactness of determination of currents in their walls, and also parameters of their location. The numerical design of the offered method, which confirmed its capacity and possibility of the use at presence of industrial hindrances in the results of supervisions, is conducted.

Тривала експлуатація технологічних і магістральних нафтогазопроводів в процесі видобутку нафти і газу і їх транспортуванні вимагає безперервного контролю стану їх ізоляційного покриття. Серед відомих контактних і безконтактних методів більша продуктивність властива безконтактним методам [1].

Одним із безконтактних методів контролю стану ізоляційного покриття, який отримав широке розповсюдження, є електромагнітний метод [2, 3], суть якого полягає у вимірюванні горизонтальної  $H_y$  чи (і) вертикальної  $H_z$  складової магнітного поля над одним підземним трубопроводом, в стінках якого протікає змінний струм  $I$

$$H_y = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Iz}{z^2 + y^2}, \quad H_z = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Iy}{z^2 + y^2}, \quad (1)$$

або над двома гальванічно з'єднаними підземними трубопроводами із струмами  $I_1$  і  $I_2$  відповідно

$$H_y = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{I_1 z_1}{z_1^2 + y^2} + \frac{I_2 z_2}{z_2^2 + (y-b)^2} \right),$$

$$H_z = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{I_1 y}{z_1^2 + y^2} + \frac{I_2 \cdot (y-b)}{z_2^2 + (y-b)^2} \right), \quad (2)$$

де  $z$  і  $y$  – вертикальна і горизонтальна координати точки контролю по відношенню до осі трубопроводу або до осі лівого трубопроводу у випадку двох трубопроводів,  $b$  – відстань між трубопроводами. При цьому до підземного трубопроводу підключають генератор змінного струму, частота якого може перебувати в діапазоні 25 Гц – 2,0 кГц і в результаті наявності пошкоджень ізоляційного покриття чи погіршення його ізоляції струми  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  в стінках трубопроводів з віддалю від точки під'єднання до них генератора зменшуються не тільки із збільшенням цієї віддалі, а і внаслідок зникання струму через погіршену ізоляцію в землю. Тому місця із різкими зменшеннями струмів  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  пов'язані із незадовільним станом ізоляції трубопроводів, що необхідно виявити з прив'язкою до місця контролю.

На рис. 1 а) показані теоретичні профілі  $H_y$  і  $H_z$  для одного трубопроводу, а на рис. 1 б) для двох паралельних гальванічно з'єднаних трубопроводів, отриманих згідно (1) і (2) при строго перпендикулярному напрямку проходження через трубопроводи зліва направо.

Як видно із рис. 1 а) також із (1) і (2) при відомих  $z$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $b$ , виміряних  $H_y$  чи  $H_z$  в одній із точок над одним чи двома підземними трубопроводами, горизонтальна координата  $y$  якої по відношенню до осі одного, чи до осі першого зліва із двох трубопроводів є відомими, можна визначити струми в стінках таких трубопроводів.

Однак при проведенні вимірювань в реальних умовах  $z$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $b$ , а також координата  $y$  точки проведення вимірювання  $H_y$  і  $H_z$  є невідомими. Більше того, безпосередньо на вимірювальні горизонтальну і вертикальну складові напруженості накладаються різні промислові завади, що може суттєво вплинути на визначені значення струмів  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ .

Тому з урахуванням вищевказаного пропонується використовувати пристрій з п'яти певним чином розміщених магнітних антен, за допомогою якого необхідно здійснювати безперервне вимірювання або горизонтальної або вертикальної складових напруженості магнітного поля, або обох напруженостей при проходженні із пристроєм в перпендикулярному напрямку над контрольованими підземними трубопроводами з отриманням в процесі такого вимірювання масиву  $M_1$  результатів спостережень цих напруженостей через кожні 10 мс, що при швидкості руху 3,6 км/год (1 м/с) дозволяє отримати  $H_y$  і  $H_z$  через кожні 10 мм і з подальшою обробкою масиву даних  $M_1$  з метою одержання нового масиву результатів спостережень  $M_2$  значень напруженостей через кожні  $\Delta y = y_{i+1} - y_i$  (наприклад,  $\Delta y = 0,25$  м) [4 – 6].

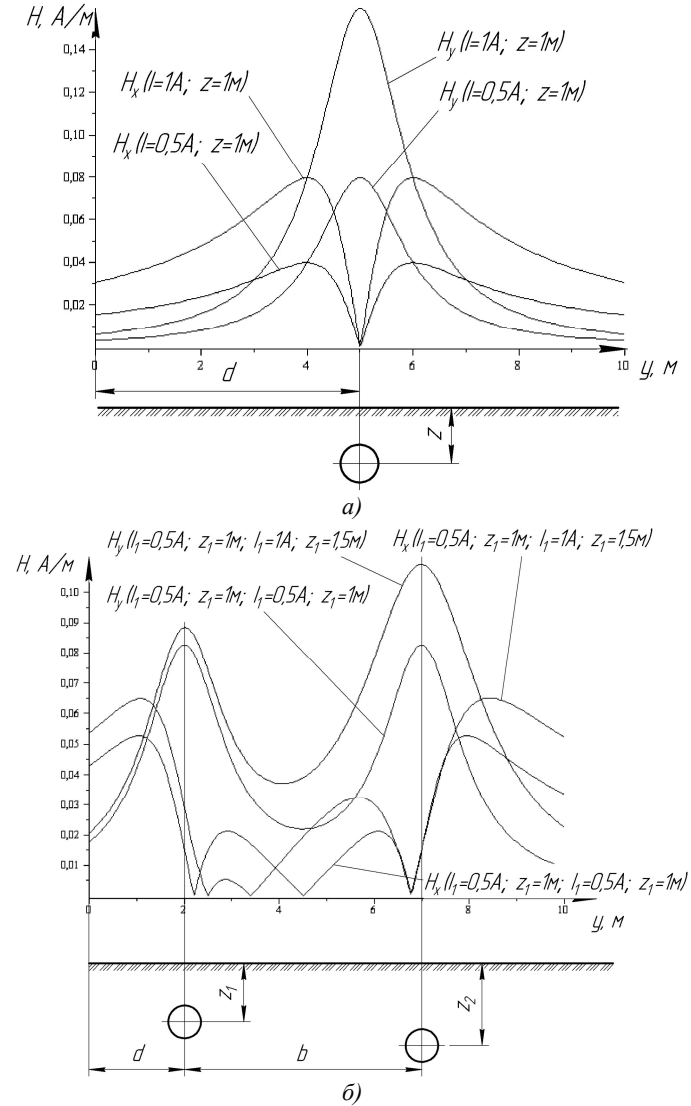


Рис. 1. Профілі  $H_y$ ,  $H_z$  над одним (а) та двома (б) підземними трубопроводами

В результаті масив  $M_2$  буде містити  $n$  пар значень  $H_y$  і  $H_z$  для кожного  $y_i$ , де  $i = 1 \div n$ ,  $n = \text{int}(l/\Delta y)$ ,  $l$  - реальна довжина шляху від початку до кінця маршруту в перпендикулярному напрямку над трубопроводами.

Наприклад, при  $l = 10,15$  м і  $\Delta y = 0,25$  м  $n = 40$ , а кількість пар значень масиву даних  $M_1$  буде становити 10150.

Так як перед початком проведення вимірювань напруженостей над одним трубопроводом відстань  $d$  від першої точки до осі трубопроводу так само як і параметри  $z$ ,  $I$  є невідомими, а кількість пар даних  $n$  масиву  $M_2$  суттєво перевищує кількість невідомих, то на основі рівнянь (1) можна отримати  $n$  умовних рівнянь виду

$$H_{yi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Iz}{z^2 + (y_i - d)^2} \quad (3)$$

і  $n$  умовних рівнянь виду

$$H_{zi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{I(y_i - d)}{z^2 + (y_i - d)^2}, \quad (4)$$

кожне із яких описує однакового виду залежність  $H_y = f_1(I, z, y, d)$ , чи залежність  $H_z = f_2(I, z, y, d)$  відповідно.

Маючи  $n$  умовних рівнянь, наприклад, виду (3), необхідно на їх основі отримати певну кількість нормальних рівнянь, в результаті розв'язку яких можна буде визначити  $d$ ,  $I$ ,  $z$ . Це дасть змогу зменшити вплив завад, які будуть мати місце в даних масивів  $M_1$  і  $M_2$  на результати розрахунку  $d$ ,  $I$ ,  $z$ .

Продемонструємо одержання нормальних рівнянь на основі  $n$  умовних рівнянь виду (3) для одного трубопроводу. Для цього перетворимо умовні рівняння (3) до такого виду

$$Iz - 2\pi H_{yi} z^2 - 2\pi H_{yi} y_i^2 + 4\pi H_{yi} y_i d - 2\pi H_{yi} d^2 = 0. \quad (5)$$

Умовні рівняння виду (5) представимо так

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 = c_i, \quad (6)$$

де  $x_1 = Iz$ ,  $x_2 = z^2$ ,  $x_3 = d$ ,  $x_4 = d^2$ ,  $a_{i1} = 1$ ,  $a_{i2} = -2\pi H_{yi}$ ,  $a_{i3} = 4\pi H_{yi} y_i$ ,  $a_{i4} = -2\pi H_{yi}$ ,  $c_i = 2\pi H_{yi} y_i^2$ ,  $i = 1 \div n$ .

Для одержання першого нормального рівняння необхідно кожне із умовних рівнянь (6) перемножити на коефіцієнт при  $x_1$  і після цього просумувати одержані рівняння. Для одержання другого нормального

рівняння необхідно кожне із умовних рівнянь (6) перемножити на коефіцієнт при  $x_2$  і після цього просумувати отримані рівняння і т.д. [7].

В результаті проведення такої процедури отримаємо наступну систему нормальних рівнянь

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (a_{i1}^2) x_1 + \sum_{i=1}^n (a_{i1} a_{i2}) x_2 + \sum_{i=1}^n (a_{i1} a_{i3}) x_3 + \sum_{i=1}^n (a_{i1} a_{i4}) x_4 = \sum_{i=1}^n (c_i a_{i1}), \\ \sum_{i=1}^n (a_{i2} a_{i1}) x_1 + \sum_{i=1}^n (a_{i2}^2) x_2 + \sum_{i=1}^n (a_{i2} a_{i3}) x_3 + \sum_{i=1}^n (a_{i2} a_{i4}) x_4 = \sum_{i=1}^n (c_i a_{i2}), \\ \sum_{i=1}^n (a_{i3} a_{i1}) x_1 + \sum_{i=1}^n (a_{i3} a_{i2}) x_2 + \sum_{i=1}^n (a_{i3}^2) x_3 + \sum_{i=1}^n (a_{i3} a_{i4}) x_4 = \sum_{i=1}^n (c_i a_{i3}), \\ \sum_{i=1}^n (a_{i4} a_{i1}) x_1 + \sum_{i=1}^n (a_{i4} a_{i2}) x_2 + \sum_{i=1}^n (a_{i4} a_{i3}) x_3 + \sum_{i=1}^n (a_{i4}^2) x_4 = \sum_{i=1}^n (c_i a_{i4}). \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язавши (7) відносно  $x_1 \div x_4$ , знаходять значення параметрів  $d$ ,  $z$ ,  $I$

$$d = x_3; \quad z = \sqrt{x_2}; \quad I = x_1 / \sqrt{x_2}. \quad (8)$$

Аналогічним чином можна одержати нормальні рівняння на основі умовних рівнянь виду (4), розв'язавши які можна буде також визначити значення  $d$ ,  $z$ ,  $I$ .

Розглянемо методику одержання умовних і нормальних рівнянь для двох гальванічно з'єднаних підземних трубопроводів на основі рівнянь (2).

Умовні рівняння на базі даних  $H_{yi}$  будуть такими

$$H_{yi} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{I_1 z_1}{z_1^2 + (y_i - d)^2} + \frac{I_2 z_2}{z_2^2 + (y_i - d - b)^2} \right], \quad (9)$$

а на базі  $H_{zi}$  такими

$$H_{zi} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{I_1 (y_i - d)}{z_1^2 + (y_i - d)^2} + \frac{I_2 (y_i - d - b)}{z_2^2 + (y_i - d - b)^2} \right]. \quad (10)$$

Маючи  $n$  умовних рівнянь, наприклад, виду (9), необхідно на їх основі отримати відповідну кількість нормальних рівнянь, в результаті розв'язку яких можна буде визначити  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $b$ ,  $d$ . Це аналогічно, як із одним підземним трубопроводом дасть змогу зменшити вплив завад, які будуть мати місце в даних масивів  $M_1$  і  $M_2$  на результати розрахунків  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $b$ ,  $d$ .

Продемонструємо одержання нормальних рівнянь на основі  $n$  умовних рівнянь виду (9) для двох трубопроводів. Для цього перетворимо умовні рівняння (9) до умовних рівнянь такого виду шляхом відповідного їх перетворення

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 + a_{i5}x_5 + a_{i6}x_6 + a_{i7}x_7 = c_i, \quad (11)$$

де  $x_1 = I_1 z_1 + I_2 z_2$ ,  $x_2 = b + 2d$ ,  $x_3 = dI_1 \cdot z_1 + dI_2 \cdot z_2 + bI_1 z$ ,  
 $x_4 = I_1 z_1 z_2^2 + d^2 I_1 z_1 + 2dI_1 z_1 b + I_1 z_1 b^2 + I_2 z_2 z_1^2$ ,  
 $x_5 = z_1^2 z_2^2 + z_1^2 b^2 + d^2(z_1^2 + z_2^2 + b^2) + d^4 + 2dz_1^2 b$ ,  
 $x_6 = z_1^2 + z_2^2 + b^2 + 6db + 6d^2$ ,  $x_7 = d(z_1^2 + z_2^2 + b^2) + z_1^2 b + 3d^2 b + 2d^3$ ,  
 $a_{i1} = y_i^2$ ,  $a_{i2} = 4\pi H_{yi} y_i^3$ ,  $a_{i3} = -2y_i$ ,  $a_{i4} = 1$ ,  $a_{i5} = -2\pi H_{yi}$ ,  $a_{i6} = -2\pi H_{yi} y_i^2$ ,  
 $a_{i7} = 4\pi H_{yi} y_i$ ,  $c_i = 2\pi H_{yi} y_i^4$ ,  $i = 1 \div n$ .

Слід відмітити, що кількість умовних рівнянь (9) і (11) буде дорівнювати  $n$  і таке перетворення з метою недопущення помилок при цьому слід робити в середовищі Maple за допомогою персонального комп'ютера, що і було зроблено.

В результаті переходу від умовних рівнянь (11) до нормальних рівнянь отримаємо таку систему нормальних рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^7 \left( x_k \sum_{i=1}^n (A_{i,1} A_{i,k}) \right) = \sum_{i=1}^n (A_{i,1} C_i), \\ \sum_{k=1}^7 \left( x_k \sum_{i=1}^n (A_{i,2} A_{i,k}) \right) = \sum_{i=1}^n (A_{i,2} C_i), \\ \dots \\ \sum_{k=1}^7 \left( x_k \sum_{i=1}^n (A_{i,7} A_{i,k}) \right) = \sum_{i=1}^n (A_{i,7} C_i), \end{cases} \quad (12)$$

де  $A_{i,j} = \begin{vmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,j} & \dots & a_{1,k} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,j} & \dots & a_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i,1} & a_{i,2} & \dots & a_{i,j} & \dots & a_{i,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,j} & \dots & a_{n,k} \end{vmatrix}$ ,  $j = 1 \div k$ ,  $k = 7$ .

Розв'язавши систему рівнянь (12) знаходять змінні  $x_1 \div x_7$ , на основі яких в подальшому необхідно визначити параметри  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $b$ ,  $d$ .

Параметр  $d$  необхідно знайти шляхом розв'язку такої системи рівнянь, яка також отримана за допомогою персонального комп'ютера і програмного середовища Maple

$$\begin{cases} 8x_6 x_2^2 d^2 - x_6^2 x_2 d + x_6 x_2 x_7 - 16d^3 x_6 x_2 + 4d^2 x_2 x_7 - x_7^2 - 16x_2^3 d^3 + \\ + 8d^4 x_6 + d^2 x_6 - 48d^5 x_2 + 48d^4 x_2^2 + 16d^6 - 4d \cdot x_2^2 x_7 = x_5 (2d - x_2)^2, \\ d > 0, \\ x_2 - 2d > 0. \end{cases} \quad (13)$$

Параметр  $b$  розраховують так

$$b = x_2 - 2d, \quad (14)$$

глибини  $z_1$  і  $z_2$  шляхом розв'язку такої системи рівнянь

$$\begin{cases} d(z_1^2 + z_2^2 + b^2) + z_1^2 \cdot b + 3d^2 b + 2d^3 = x_7, \\ z_1^2 + z_2^2 + b^2 + 6 \cdot d \cdot b + 6 \cdot d^2 = x_6, \\ z_1 > 0, \\ z_2 > 0, \end{cases} \quad (15)$$

а струми  $I_1$  і  $I_2$  шляхом розв'язку таких рівнянь

$$\begin{cases} I_1 z_1 + I_2 z_2 = x_1, \\ dI_1 \cdot z_1 + dI_2 z_2 + bI_1 z_1 = x_3. \end{cases} \quad (16)$$

Аналогічним чином можна отримати і розв'язати систему нормальних рівнянь на базі результатів спостережень вертикальної складової напруженості магнітного поля.

З метою перевірки працездатності запропонованої методики було проведено числове моделювання з її використанням для визначення параметрів одного і двох підземних трубопроводів. При цьому були згенеровані випадковим чином вихідні дані для одного ( $d$ ,  $I$ ,  $z$ ) і для двох ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $b$ ,  $d$ ) трубопроводів, на основі яких і залежностей (1) і (2) для горизонтальної складової напруженості магнітного поля були отримані бази даних  $M_2$  для конкретних значень  $\Delta u$ . В подальшому на основі цих баз даних згідно описаних методик були отримані нормальні рівняння (7) чи (12), розв'язок яких дозволив отримати значення параметрів одного чи двох трубопроводів для кожної сукупності вихідних даних (табл. 1, табл. 2).

Таблиця 1.

Результати числового моделювання використання методики для одного трубопроводу

Вихідні дані			Завади, %	Обчислені дані			Відносна похибка, %		
$I, A$	$z, m$	$d, m$		$I, A$	$z, m$	$d, m$	$I$	$z$	$d$
0,481	2,897	3,849	0	0,481	2,897	3,849	0,000	0,000	0,000
0,796	0,880	5,424	0	0,796	0,880	5,424	0,000	0,000	0,000
0,103	1,449	4,055	0	0,103	1,449	4,055	0,000	0,000	0,000
0,747	1,372	2,196	2	0,746	1,373	2,197	0,061	0,093	0,026
0,243	0,960	5,776	2	0,243	0,961	5,774	0,134	0,131	0,026
0,529	3,082	2,265	2	0,529	3,074	2,263	0,006	0,231	0,087
0,094	1,290	2,500	5	0,094	1,294	2,500	0,009	0,280	0,021
0,846	3,030	2,670	5	0,850	3,039	2,664	0,539	0,315	0,222
0,949	1,034	4,113	5	0,952	1,030	4,111	0,356	0,365	0,047
0,077	2,900	3,831	10	0,077	2,862	3,830	0,669	1,316	0,018
0,731	2,038	4,543	10	0,732	2,030	4,547	0,216	0,383	0,087
0,508	1,934	2,080	10	0,510	1,925	2,074	0,432	0,459	0,305
0,578	0,731	2,900	15	0,581	0,739	2,891	0,418	1,154	0,285
0,507	2,569	2,319	15	0,502	2,527	2,347	0,902	1,629	1,221
0,089	2,265	2,970	15	0,090	2,261	2,988	1,722	0,194	0,623

Таблиця 2.

Результати числового використання методики для двох трубопроводів

Вихідні дані					Завади, %	Обчислені дані					Відносна похибка, %				
$I_1, A$	$z_1, m$	$I_2, A$	$z_2, m$	$b, m$		$I_1, A$	$z_1, m$	$I_2, A$	$z_2, m$	$b, m$	$I_1$	$z_1$	$I_2$	$z_2$	$b$
0,23	2,98	0,49	0,99	2,51	0	0,23	2,98	0,49	0,99	2,51	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,30	1,21	0,73	3,40	2,18	0	0,30	1,21	0,73	3,40	2,18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,17	2,01	0,59	2,82	2,64	0	0,17	2,01	0,59	2,82	2,64	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,29	2,84	0,90	1,31	3,50	0	0,29	2,84	0,90	1,31	3,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,67	2,98	0,67	2,32	4,85	0	0,67	2,98	0,67	2,32	4,85	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,58	2,82	0,97	0,70	3,51	1	0,58	2,82	0,97	0,70	3,52	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3
0,87	1,38	0,41	0,70	2,47	1	0,87	1,38	0,41	0,69	2,47	0,9	0,0	0,8	0,7	0,2
0,26	1,79	0,90	0,87	2,72	1	0,26	1,79	0,90	0,87	2,72	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1
0,45	1,47	0,57	1,05	2,17	1	0,45	1,46	0,57	1,04	2,16	1,08	0,37	0,18	0,90	0,70
0,74	0,68	0,31	2,91	4,50	2	0,75	0,68	0,32	2,93	4,48	1,3	0,5	2,4	0,7	0,6
0,84	2,39	0,57	2,14	3,27	2	0,84	2,39	0,56	2,11	3,28	0,3	0,1	1,4	1,0	0,5
0,32	1,69	0,77	0,81	4,56	2	0,32	1,68	0,78	0,81	4,55	0,3	0,7	0,4	0,3	0,2
0,13	2,79	0,07	1,74	4,22	2	0,12	2,75	0,06	1,78	4,28	3,9	1,6	1,9	2,1	1,3
0,96	1,89	0,22	3,20	4,12	3	0,93	1,90	0,21	3,32	4,25	2,3	0,4	1,9	3,8	3,3
0,21	3,17	0,63	0,53	2,35	3	0,21	3,18	0,63	0,53	2,37	0,3	0,3	0,4	0,3	0,6
0,38	1,52	0,28	0,81	4,85	3	0,38	1,52	0,29	0,82	4,85	0,2	0,1	0,7	0,4	0,0
0,11	2,89	0,12	2,57	3,61	5	0,10	2,89	0,12	2,66	3,78	5,8	0,2	1,2	3,4	4,7

Продовження табл. 2

Вихідні дані					Завади, %	Обчислені дані					Відносна похибка, %				
$I_1, A$	$z_1, m$	$I_2, A$	$z_2, m$	$b, m$		$I_1, A$	$z_1, m$	$I_2, A$	$z_2, m$	$b, m$	$I_1$	$z_1$	$I_2$	$z_2$	$b$
0,91	1,41	0,97	3,46	2,84	5	0,88	1,45	0,97	3,60	2,93	3,1	3,0	0,3	3,9	2,9
0,59	1,34	0,23	1,44	2,89	5	0,59	1,32	0,24	1,40	2,86	0,9	1,6	5,2	3,3	1,1
0,78	0,91	0,60	3,01	3,70	5	0,75	0,92	0,57	2,94	3,82	3,1	1,0	4,5	2,3	3,3

Слід відмітити, що з метою оцінки впливу завад на дані профілів горизонтальної складової магнітного поля були накладені завади певних значень.

Аналізуючи отримані результати числового моделювання у приведених таблицях, можна стверджувати, що запропонована методика обробки горизонтальної складової напруженості магнітного поля над підземними трубопроводами при відсутності завад для одного і двох трубопроводів дозволяє отримати відповідні параметри практично без похибки, при наявності завад в масиві даних  $M_2$  до 5% похибка визначення струмів в стінках одного трубопроводу не буде перевищувати 0,54%, двох трубопроводів – не більше 5,2%. Із збільшенням завад в масивах даних похибки отриманих результатів зростають.

Таким чином можна вважати, що запропонована методика обробки багатократних результатів спостережень може бути рекомендована для використання при безконтактному контролі стану підземних трубопроводів з метою визначення місць погіршеної ізоляції на основі визначених значень струмів в стінках цих трубопроводів при наявності відповідної обчислювальної техніки і спеціально розробленого програмного забезпечення.

**Список літератури:** 1. Джала Р. М. Електромагнітні обстеження і контроль корозії трубопроводів // Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідник.—Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. 3. Т. Назарчука.—Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України.—2001.—Розд. 5.—С. 263-330. 2. Костів Б.В., Кісіль І.С. Вимірювання напруженості магнітного поля над паралельними підземними нафтогазопроводами з метою безконтактного контролю стану їх ізоляції // Методи і прилади контролю якості. – 2007. – № 19. – С. 31-34. 3. Джала Р.М., Мізюк Л.Я., Максименко О.П., Сенюк О.І. Дослідження магнітного поля паралельних трубопроводів, збуджених струмами низької частоти // Методи і прилади контролю якості. – 1999. – № 4. – С.3-6. 4. Джала Р.М. Методи безконтактних вимірювань струмів при корозійних обстеженнях підземних трубопроводів // Протикорозійний захист підземних споруд та методи неруйнівного контролю, КСП-97 – Львів: ФМІ, 1997. – С. 15-36. 5. Патент США №5093622, G01V 3/11, Method and Apparatus for determining direction to and position of an underground conductor, 3.03.1992. 6. Патент США №4542344, G01V 3/11, Detecting buried pipeline depth and location with electromagnetic triangulation, 17.09.1985. 7. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навч. посібник. – Івано-Франківськ: видавництво «Факел», 2002. – 400с.